



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 103 11 028 A1 2004.10.07

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 103 11 028.3
(22) Anmeldetag: 13.03.2003
(43) Offenlegungstag: 07.10.2004

(51) Int Cl.⁷: H02P 6/18
H02P 21/00

(71) Anmelder:
Siemens AG, 80333 München, DE

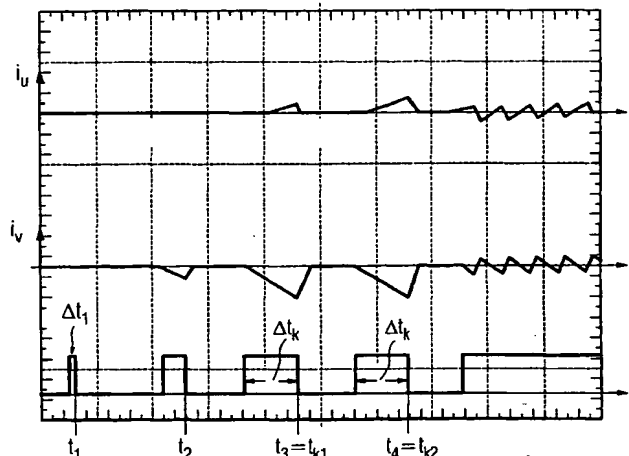
(72) Erfinder:
Frenzke, Thorsten, 91056 Erlangen, DE

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Bestimmung einer Startrotorlage und Drehzahl bei Impulsfreigabe einer stromrichter-
tergespeisten, permanenterregten Synchronmaschine ohne Lage- und Drehzahlgeber**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung einer Startrotorlage (γ) und Drehzahl (ω) bei Impulsfreigabe einer stromrichter-
tergespeisten, permanenterregten Synchronmaschine (2) ohne Lage- und Drehzahlgeber, wobei für eine vorbestimmte Einschalt-
dauer (Δt) ein Nullspannungszeiger (V7, V8) an die Synchronmaschine (2) geschaltet wird, wobei mit Ablauf dieser
Einschalt-
dauer (Δt) eine Stromantwort (i_u , i_v) gemessen und eine Impulssperre geschaltet werden, wobei aus der
Stromantwort (i_u , i_v) ein Strombetrag (I_1) und ein Stromwin-
kel (ϵ_1) eines zugehörigen Stromraumzeigers berechnet
werden, wobei diese Verfahrensschritte nach einer vorbe-
stimmten Zeitspanne wiederholt werden, und wobei aus
den berechneten Strombeträgen (I_1 , I_2) und Stromwinkeln
(ϵ_1 , ϵ_2) eine Startrotorlage (γ) und eine Drehzahl (ω) be-
stimmt werden. Erfindungsgemäß wird für die Einschalt-
dauer (Δt) des ersten Nullspannungszeigers (V7, V8) ein
Minimalwert ($\Delta t(1)$) berechnet, der in Abhängigkeit einer
Stromantwort (i_u , i_v) derart verlängert wird, dass nach An-
schaltung eines weiteren Nullspannungszeigers (V7, V8)
eine Stromantwort (i_u , i_v) mit vorbestimmtem Strombetrag
(I_{sol}) sich einstellt, und wird der zweite Nullspannungszei-
ger (V7, V8) für diese verlängerte Einschalt-
dauer ($\Delta t(k+1)$) an die Synchronmaschine (2) angeschaltet. Somit erhält
man ein Startverfahren zur Detektion der anfänglichen Ro-
torposition (γ) und Drehzahl (ω) bei Impulssperre eines
einer permanenterregte ...



Beschreibung

- [0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung einer Startrotorlage und Drehzahl bei Impulsfreigabe einer permanenterregten Synchronmaschine ohne Lage- und Drehzahlgeber.
- [0002] Zur dynamischen Regelung von permanenterregten Synchronmaschinen wird üblicherweise ein Verfahren der feldorientierten Regelung eingesetzt. Dabei wird der Raumzeiger der gemessenen Maschinenströme in zwei Komponenten zerlegt, die sich durch Projektion in Richtung des von den Permanentmagneten erzeugten Fluss-Raumzeigers ("Längsachse") bzw. senkrecht dazu ("Querachse") ergeben. Durch Regelung der beiden Stromkomponenten in diesem relativ zur Rotorlage festen Koordinatensystem kann das gewünschte Drehmoment und der Ständerfluss der Maschine eingestellt werden.
- [0003] Für die Feldorientierung muss die Lage des von den Permanentmagneten erzeugten Flusses bekannt sein, die zwar fest mit der mechanischen Läuferlage verbunden ist, sich bei Drehung der Maschine aber auch verändert. Oft wird zur Vorsteuerung der Stromregelung oder für eine überlagerte Drehzahlregelung außerdem noch die Drehzahl benötigt. Zur Bestimmung der Polradlage und der Drehzahl werden in der Regel spezielle Rotorlagemeßsysteme eingesetzt. Diese Meßsysteme sind aber meist sehr teuer, erfordern eine genaue und damit aufwändige Justage, erhöhen das Gewicht und beanspruchen Einbauraum in der Maschine. Die zusätzlich erforderlichen Signalleitungen erhöhen die Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Anschlusses mit Fehlfunktionen oder Folgeschäden. Bei Einsatz unter schwierigen Umgebungsbedingungen wie mechanischen Erschütterungen und hohen Temperaturen kann die Zuverlässigkeit des Antriebs durch die Empfindlichkeit des Meßsystems stark beeinträchtigt werden. Bei Verwendung rein inkrementeller Geber ergibt sich das zusätzliche Problem, das nach dem Einschalten nicht die absolute, sondern nur eine relative Lage bekannt ist. Erst nachdem ein eventueller Lageoffset abgeglichen ist, was häufig durch Passieren bestimmter zusätzlicher Referenzmarken erfolgt, ist die absolute Lage bekannt.
- [0004] Wegen der Nachteile bekannter Lagegeber sind daher verschiedene Verfahren zum Betrieb von permanenterregten Synchronmaschinen ohne Rotorlagegeber veröffentlicht, die die erwähnten Nachteile vermeiden, indem sie den mechanischen Lagegeber überflüssig machen. Die Rotorlage wird meist mit Hilfe eines Maschinenmodells aus den gemessenen Maschinenströmen bestimmt. Auf eine Messung der Maschinenspannungen wird fast immer verzichtet, da diese zu ungenau ist und zusätzlichen Aufwand verursacht. Statt dessen werden die Motorspannungen aus bekannten Größen abgeleitet. Beispielsweise werden als Motorspannungen einfach die Sollspannungen der feldorientierten Regelung verwendet.
- [0005] Prinzipbedingt können solche Verfahren erst eine Lage- und Drehzahlinformation liefern, wenn der lastseitige Stromrichter, der vorzugsweise als Wechselrichter betrieben wird, eingeschaltet ist. Soweit nicht weitere Informationen über das Antriebsverhalten verfügbar sind, ist daher sowohl die Rotorlage als auch die Drehzahl unbekannt, solange die Wechselrichterimpulse gesperrt sind.
- [0006] Zum Start eines Antriebs, bestehend aus dem lastseitigen Stromrichter und einer daran angeschlossenen permanenterregten Synchronmaschine, benötigen bekannte Verfahren zum Betrieb von permanenterregten Synchronmaschinen ohne Rotorlagegeber deshalb zusätzliche Verfahren, die im Folgenden als "Startverfahren" bezeichnet werden, die sich von den später im laufenden Betrieb eingesetzten Verfahren unterscheiden. Die meisten bekannten "Startverfahren" setzen voraus, dass sich die Maschine beim Einschalten im Stillstand befindet, und ermitteln deshalb nur die anfängliche Rotorlage zur Initialisierung der Lageschätzung für den laufenden Betrieb.
- [0007] Für viele Industrieanwendungen, bei denen der Antrieb nach einer Impulssperre entweder austrudelt oder stillsteht, z.B. durch eine Haltebremse erzwungen, mag dies ausreichend sein. Es gibt aber auch Anwendungen, z.B. in der Traktion, die es erfordern, die Maschine nach einer Impulssperre bei jeder Drehzahl zu "fangen", d.h. möglichst schnell und ohne unerwünschte Begleiterscheinungen wie Überstrom oder unzulässige Drehmomentstöße wieder zuschalten zu können.
- [0008] Dazu ist ein Startverfahren zur Detektion der anfänglichen Rotorposition und Drehzahl bei Impulsfreigabe notwendig, das möglichst im gesamten Drehzahlbereich zuverlässig und genau arbeitet.

Stand der Technik

- [0009] In der Veröffentlichung "Initial Rotor Angle Detection Of A Non-Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Machine" von P.B. Schmidt et. al. abgedruckt in den Proceedings des IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, USA, October 5-9, 1997, ist ein einfaches Verfahren zur Ermittlung der anfänglichen Rotorposition beschrieben. Bei Stillstand der Maschine werden nacheinander sechs aktive Spannungszeiger mit unterschiedlicher räumlicher Wirkungsrichtung für vorbestimmte Zeitspannen an die Maschine angelegt. Die Zeitspannen dieser Spannungszeiger sind dabei so groß bemessen, dass die resultierenden Ströme die Vorsättigung des Ständereisens durch die Permanentmagnete je nach Rotorlage messbar verstärken oder abschwächen. Die Änderung der Phasenströme während der Spannungspulse wird jeweils gemessen und daraus die Rotorlage berechnet.

[0010] Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass es Stillstand der Maschine voraussetzt. Zwar lässt sich das Verfahren auch bei sehr langsamer Drehung der Maschine anwenden, wobei dann aber mit zunehmender Drehzahl die ermittelte Rotorlage immer größere Fehler aufweist. Eine Ursache dafür ist, dass die Rotorlage während der Messung nicht gleich bleibt, sondern sich von Spannungszeiger zu Spannungszeiger merklich ändert. Vor allem aber beeinflusst die bei Rotordrehung induzierte Spannung direkt die gemessenen Stromänderungen. Zudem liefert das Verfahren keinerlei Drehzahlinformation.

[0011] Aus der internationalen Offenlegungsschrift WO 90/12278 mit dem Titel "Verfahren zur sensorlosen Drehwinkelerfassung von dämpferlosen, vorzugsweise permanentenregten Synchronmaschinen" ist ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der Rotorposition bekannt. Bei diesem bekannten Verfahren generiert der die Synchronmaschine speisende Umrichter als Testsignale Spannungssprünge, um jeweils aus einem Anstieg des Stromraumzeigerbetrages die differentielle Induktivität zu ermitteln. Daraus kann dann, bis auf eine Unsicherheit von 180° el., auf die Rotorlage geschlossen werden. Der Effekt der rotatorisch induzierten Spannung im laufenden Betrieb soll durch Kombination von zwei Messungen minimiert werden. Beim Start des Systems muss die Rotorlage einmalig eindeutig bestimmt werden. Dazu wird, nach Ermittlung der Rotorlage bis auf die 180° -Unsicherheit, durch einen relativ großen Statorstromraumzeiger der magnetische Arbeitspunkt verschoben und jeweils eine Messung bei feldschwächender und feldstärkender Wirkung durchgeführt.

[0012] Dieses Verfahren weist mehrere Nachteile auf und lässt sich nur bei Stillstand oder mäßiger Drehzahl der permanentenregten Synchronmaschine erfolgreich zum Start der Maschine anwenden. Bei höheren Drehzahlen ergibt sich zum einen wiederum das Problem, das sich die Rotorlage während den erforderlichen Messungen stark ändert. Dies kann bei sehr hohen Drehzahlen dazu führen, dass der betragsmäßig große Statorstromraumzeiger nicht wie beabsichtigt den magnetischen Arbeitspunkt mit feldschwächender oder feldstärkender Wirkung verschiebt, sondern starke Drehmomentstöße verursacht. Des weiteren liefert das Verfahren keinerlei direkte Drehzahlinformation. Zur Ermittlung der Drehzahl sind mehrere Messungen erforderlich. Außerdem wird die Auswirkung der rotatorisch induzierten Spannung nur in den Messungen kompensiert, nicht in den resultierenden Strömen selbst.

[0013] Die Anwendung der beiden oben erwähnten Verfahren in Kombination mit Umrichtern für hohe Leistungen, die meist nur niedrige Schaltfrequenzen gestatten und eine zeitdiskrete Regelung haben, kann deshalb bei höheren Drehzahlen unzulässig hohe Drehmomente erzeugen oder sogar zu Überstromabschaltungen führen, schon bevor die eigentlichen Messungen überhaupt erst abgeschlossen sind.

[0014] Ein Startverfahren, das zur Ermittlung der anfänglichen Rotorlage und Drehzahl auch bei hohen Drehzahlen geeignet ist, wird in der EP 1195611 A1 mit dem Titel "Sensor For Sensing Rotating State Of Synchronous Machine And Method Of Sensing Rotating State Of Synchronous Machine" beschrieben. Zur Bestimmung von Drehzahl und Rotorlage schaltet der die Synchronmaschine speisende Stromrichter einen sogenannten Nullspannungszeiger ein. D.h., es werden entweder alle oberen oder alle unteren Ventile dieses lastseitigen Stromrichters eingeschaltet. Dadurch wird die Maschine ständerseitig quasi kurzgeschlossen. Bei drehender Maschine baut sich durch diesen Stoßkurzschluss schnell ein Stromfluss auf. In sehr kurzen Zeitabständen werden die Ströme gemessen und dahingehend überprüft, ob ein vorgegebener Betrag erreicht worden ist. Falls ja, werden die gemessenen Ströme und die bisherige Einschaltdauer abgespeichert. Nach nochmaligem Verstreichen dieser abgespeicherten Zeit, d.h. nach zweifacher Einschaltdauer, werden erneut die Ströme gemessen und abgespeichert. Die Impulse werden anschließend wieder gesperrt (Impulssperre), damit die Ströme Null werden. Durch Auswertung der gemessenen Ströme kann die Rotorlage und die Drehzahl nach Betrag und Drehrichtung bestimmt werden.

[0015] Falls bei diesem Verfahren der gemessene Strombetrag selbst nach Ablauf einer maximalen Einschaltdauer nicht den vorgegebenen Wert erreicht hat, wird die Drehzahl Null ausgegeben. D.h., es wird gefolgert, dass die Rotorlage mit diesem Verfahren nicht bestimmt werden kann, da sich die Maschine nicht dreht.

[0016] Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass es bei niedriger Drehzahl keinerlei Lageinformation und eine ungenaue Drehzahlinformation liefert. Außerdem ist eine ausreichend schnelle Abtastung der Stromistwerte erforderlich, damit auch bei höchster Drehzahl der Strom bzw. das Drehmoment nach der zweifachen Einschaltdauer keine unzulässig großen Werte annimmt.

[0017] Ein gattungsgemäßes Verfahren ist aus der japanischen Offenlegungsschrift 11-075394 bekannt. Bei diesem bekannten Verfahren wird vom lastseitigen Stromrichter an die permanentenregte Synchronmaschine nach Impulssperre ein Nullspannungszeiger für eine vorbestimmte Einschaltdauer angelegt. Mit Ablauf dieser Einschaltdauer wird vom Zustand "Nullspannungszeiger" auf den Zustand "Impulssperre" umgeschaltet. Gleichzeitig wird eine Stromantwort ermittelt, die mittels gemessener Maschinenströme der permanentenregten Synchronmaschine generiert wird. Dabei reicht es aus, wenn von den drei Maschinenströme nur zwei gemessen werden. Aus dieser Stromantwort werden zunächst orthogonale Komponenten eines Stromraumzeigers und anschließend ein Strombetrag und ein Stromwinkel dieses Stromraumzeigers berechnet. Auf der Basis des berechneten Strombetrags und einer abgespeicherten Kennlinie, die das Verhältnis von Drehzahl zu Strombetrag wiedergibt, erhält man einen Betragswert der Drehzahl. Dieser Betragswert der Drehzahl und der Stromwinkel werden abgespeichert. Infolge der Impulssperre sinken die Maschinenströme wieder auf Null. Zu

einem Zeitpunkt, zu dem die Maschinenströme wieder Null sind, wird erneut ein Nullspannungszeiger für die Einschaltdauer des ersten Nullspannungszeigers an die Synchronmaschine gelegt. Mit Ablauf dieser Einschaltdauer wird wieder aus den Maschinenströmen eine zweite Stromantwort ermittelt und die Impulse gesperrt. Aus dieser zweiten Stromantwort werden ebenfalls über orthogonale Komponenten des Stromraumzeigers dessen Strombetrag und Stromwinkel berechnet. Diese Komponenten werden in Komponenten eines mit dem Rotor umlaufenden Koordinatensystems umgerechnet. In Abhängigkeit dieser feldorientierten Komponenten, des Stromwinkels des zweiten Stromraumzeigers und einer Winkelfunktion wird die Rotorlage berechnet. In Abhängigkeit eines Vergleichs der beiden ermittelten Stromwinkel erhält man die Drehrichtung und zusammen mit dem Betragswert der Drehzahl den Wert der Drehzahl. Wenn die ermittelten Maschinenströme zu niedrig sind, wird die Einschaltdauer der Nullspannungszeiger verlängert. Somit verlängert sich bei sehr langsam drehender Maschine die Zeit für die Bestimmung einer Startrotorlage und Drehzahl immer weiter, wodurch sich die ermittelten Werte immer mehr von den tatsächlichen Werten der Maschine unterscheiden bzw. nicht mehr bestimmbar sind.

[0018] Bei den erwähnten Verfahren besteht also der Nachteil, dass sie entweder nicht im gesamten Drehzahlbereich einschließlich Stillstand anwendbar sind, nicht ausreichend genau die anfängliche Rotorlage und Drehzahl ermitteln, unzulässig hohe Ströme oder Drehmomente produzieren oder für Umrichter mit niedrigen Schaltfrequenzen bzw. Regelungsabtastrfrequenzen nicht geeignet sind.

Aufgabenstellung

[0019] Der Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde ein Verfahren zur Bestimmung einer anfänglichen Rotorlage und Drehzahl ohne Lage- und Drehzahlgeber beim Start einer stillstehenden oder drehenden permanentregten Synchronmaschine, die an einem Stromrichter betrieben wird, anzugeben, bei dem die genannten Nachteile nicht mehr auftreten.

[0020] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

[0021] Dadurch, dass für die Einschaltdauer des ersten Nullspannungszeigers ein Minimalwert berechnet wird, wird auch im Fall maximaler Drehzahl ein maximal zulässiger Stromwert bzw.

[0022] Drehmomentwert nicht überschritten. Somit wird verhindert, dass in Folge der unbekannten Drehzahl der lastseitige Stromrichter in Folge eines Überstroms bereits zu Beginn des Verfahrens abschaltet. Damit ausgehend von diesem Minimalwert für die Einschaltdauer des ersten Nullspannungszeigers in möglichst kurzer Zeit sich eine Stromantwort mit einem vorbestimmten Strombetrag einstellt, wird in Abhängigkeit einer ersten Stromantwort und einer gewünschten Stromantwort die Einschaltdauer verlängert. In Abhängigkeit dieser ermittelten Einschaltdauer wird zweimal ein Nullspannungszeiger an die Synchronmaschine gelegt und die erfassten Stromantworten ausgewertet.

[0023] Somit erhält man ein Verfahren zur Bestimmung einer Startrotorlage und Drehzahl, das einerseits verhindert, dass in Folge eines unerwünscht hohen Strombetrages einer ermittelten Stromantwort der lastseitige Stromrichter abgeschaltet wird, und andererseits in möglichst kurzer Zeit eine Startrotorlage und Drehzahl zur Verfügung steht.

[0024] Bei einem vorteilhaften Verfahren wird, wenn bei maximaler Einschaltdauer eines Nullspannungszeigers der Strombetrag einer Stromantwort kleiner als ein minimaler Strombetrag bleibt, aus diesem Strombetrag der Betrag der Drehzahl berechnet und anschließend nacheinander jeweils einer der aktiven Spannungszeiger für eine vorbestimmte Zeitspanne an die Synchronmaschine angelegt, aus den zugehörigen Stromantworten ein Summenstromzeiger gebildet, mit deren orthogonale Komponenten mittels einer Winkelfunktion eine Startrotorlage berechnet wird, aus der dann in Abhängigkeit des Stromwinkels der ersten Stromantwort eine Drehrichtung, die zusammen mit dem Betrag der Drehzahl den Wert der Drehzahl ergibt. Somit erhält man selbst bei einer langsam drehenden Synchronmaschine oder bei Stillstand sehr schnell eine Startrotorlage und Drehzahl.

[0025] Bei einem weiteren vorteilhaften Verfahren werden zusätzliche Nullspannungszeiger zu den aktiven Spannungszeigern geschaltet, aus deren Stromantworten ein korrigierender Summenstromzeiger gebildet wird, der vom Summenstromzeiger der aktiven Spannungszeiger subtrahiert wird. Somit lassen sich die EMK-bedingten Fehler, die vom Stillstand der Synchronmaschine mit Anstieg der Drehzahl die Berechnung der Startrotorlage immer mehr beeinflussen, auf einfache Weise kompensieren.

[0026] Eine besonders vollständige Kompensation wird erreicht, wenn die zusätzlichen Nullspannungszeiger symmetrisch in die Folge der aktiven Spannungszeiger eingefügt werden.

[0027] Inwieweit der korrigierende Summenstromzeiger für die Kompensation der EMK-bedingten Fehler verwendet wird, hängt von einem Gewichtungsfaktor ab, der bei gleicher Einschaltdauer von aktiven Spannungszeiger und Nullspannungszeiger sich aus dem Verhältnis der Anzahl aktiver Spannungszeiger zur Anzahl Nullspannungszeiger ergibt.

[0028] Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen sind den Unteransprüchen entnehmbar.

[0029] Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird auf die Zeichnungen Bezug genommen, in der mehrere Ausführungsformen eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung einer Startrotorlage und Drehzahl schematisch veranschaulicht sind.

[0030] **Fig. 1** zeigt ein Blockschaltbild einer Vorrichtung zur Durchführung des gattungsgemäßen Verfahrens, in der

[0031] **Fig. 2** sind in einem Diagramm jeweils über der Zeit t gemessene Maschinenströme der Vorrichtung nach **Fig. 1** dargestellt, in der

[0032] **Fig. 3** ist in einem Diagramm über der Zeit t das erfindungsgemäße Verfahren veranschaulicht, die

[0033] **Fig. 4** veranschaulicht in einem Diagramm über der Zeit t eine vorteilhafte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens, in der

[0034] **Fig. 5** ist in einem Diagramm über dem Rotorlagewinkel der Verlauf der orthogonalen Komponenten eines Stromraumzeigers dargestellt, die

[0035] **Fig. 6** zeigt eine Pulsfolge aktiver Spannungszeiger, wobei in der

[0036] **Fig. 7** in einem Diagramm über der Zeit t die zugehörigen gemessenen Maschinenströme dargestellt sind, die

[0037] **Fig. 8** zeigt in einem Diagramm über den Lagewinkel den Verlauf der orthogonalen Komponenten eines gebildeten Summenstromzeigers und wobei die

[0038] **Fig. 9** in einem Diagramm über der Zeit t eine vorteilhafte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens veranschaulicht.

[0039] In der **Fig. 1**, die ein Blockschaltbild einer Vorrichtung zur Durchführung eines gattungsgemäßen Verfahrens veranschaulicht, sind mit **2** eine permanenterregte Synchronmaschine, mit **4** ein lastseitiger Stromrichter, mit **6** eine Recheneinrichtung und mit **8** eine Messeinrichtung bezeichnet. Die Messeinrichtung **8** ist zwischen den Ausgängen des Stromrichters **4** und den Eingängen U , V und W der permanenterregten Synchronmaschine **2** geschaltet. Die gemessenen Maschinenströme i_U , i_V und i_W werden der Recheneinrichtung **6** zugeführt. Für das Verfahren ist es unerheblich, ob alle drei oder nur zwei Ströme gemessen werden, da sich der dritte Strom bekanntermaßen aus zwei gemessenen Strömen berechnen lässt, solange das Nullsystem vernachlässigbar ist. Der lastseitige Stromrichter **4** erhält von dieser Recheneinrichtung **6** Steuersignale S_V , mit denen der Stromrichter vom Zustand "Impulssperre" in den Zustand "Nullspannungszeiger" bzw. umgekehrt wechselt. Ob der Nullspannungszeiger **V7** (obere Stromrichterventile eingeschaltet) oder der Nullspannungszeiger **V8** (untere Stromrichterventile eingeschaltet) an die Synchronmaschine **2** ausgegeben wird, ist für das Verfahren zur Bestimmung einer Startrotorlage und Drehzahl unerheblich. Dieser Nullspannungszeiger **V7** bzw. **V8** wird nur für eine vorbestimmte Einschaltdauer Δt an die Synchronmaschine **2** gelegt. Außerdem generiert die Recheneinrichtung **6** ein Triggersignal S_{Tr} , wodurch die Messwerterfassung mittels der Messeinrichtung **8** gestartet wird. An den Ausgängen **10** und **12** der Recheneinrichtung **6** steht am Ende des Verfahrens eine Startrotorlage γ und eine Drehzahl ω an.

[0040] Zum Zeitpunkt t_0 wird gemäß dem Diagramm nach **Fig. 2** von dem Zustand "Impulssperre" in den Zustand "Nullspannungszeiger" gewechselt. Aufgrund des an der permanenterregten Synchronmaschine **2** angelegten Nullspannungszeigers **V7** bzw. **V8** werden die Ständerwicklungen dieser Synchronmaschine **2** für die Einschaltdauer Δt des Nullspannungszeigers **V7** bzw. **V8** kurzgeschlossen. Bei drehender Maschine **2** verursacht dieser Stoßkurzschluss aufgrund der induzierten Spannung einen Stromfluss in der Synchronmaschine **2**. Dieser Stromfluss wird mittels der Maschinenströme i_U , i_V und i_W , die in dem Diagramm jeweils über der Zeit t veranschaulicht sind, erfasst. Mit Ablauf der Einschaltdauer Δt wird mittels des Triggersignals S_{Tr} die Werte der Maschinenströme i_U , i_V und i_W erfasst und der Recheneinrichtung **6** zugeführt. Nach dieser Erfassung der Maschinenströme i_U , i_V und i_W wird der Zustand "Impulssperre" aktiviert, wodurch die Maschinenströme i_U , i_V und i_W wieder zu Null werden. Aus den gemessenen Maschinenströme i_U , i_V und i_W werden zum Zeitpunkt t_1 die Komponenten Strombetrag und Stromwinkel eines Stromraumzeigers berechnet. Diese bisherigen Verfahrensschritte werden nach Ablauf einer vorher berechenbaren Zeit, nach der die Maschinenströme i_U , i_V und i_W sicher wieder Null sind, wiederholt. Diese weiteren Verfahrensschritte sind nicht in dem Diagramm der **Fig. 2** dargestellt. Wie eingangsseitig bereits erwähnt, werden aus diesen beiden Strombeträgen und Stromwinkel eine Startrotorlage γ und eine Drehzahl ω berechnet.

[0041] Da man nicht weiß, in welchem Betriebszustand die permanenterregte Synchronmaschine **2** ist, solange eine Steuerung den lastseitigen Stromrichter **4** mittels Impulssperre sperrt, wird beim erfindungsgemäßen Verfahren nicht mit einer beliebigen Einschaltdauer Δt für einen Nullspannungszeiger **V7** bzw. **V8** begonnen, sondern mit einer minimalen Einschaltdauer Δt_i (**Fig. 3**). Falls die Synchronmaschine **2** vor der Impulsfreigabe bei hohen Drehzahlen lief, würde sich beim Anlegen eines Nullspannungszeigers **V7** bzw. **V8** sehr schnell ein unerwünscht hoher Strom- und Drehmomentwert aufbauen. Daher wird die Einschaltdauer Δt_i des Nullzeigers **V7** bzw. **V8** gemäß folgender Gleichung:

$$\Delta t_1 < \frac{I_{\max} \cdot L_q}{\omega_{\max} \cdot \hat{\Psi}_p}$$

so gering gewählt, dass auch im Falle einer maximalen Drehzahl ein maximal zulässiger Stromwert I_{\max} bzw. der entsprechende Drehmomentwert nicht überschritten wird. Nach Ablauf der vorher berechneten Einschalt-dauer Δt_1 des Nullzeigers V7 bzw. V8 werden die Stromistwerte i_u , i_v und i_w gemessen und abgespeichert. Der Stromraumzeiger nach dieser minimalen Einschalt-dauer Δt_1 ergibt sich in erster Näherung als

$$\underline{i}_1 = \underline{i}(t_1) \equiv -j\omega \cdot \frac{\hat{\Psi}_p}{L_q} \cdot \Delta t_1$$

bei der Drehzahl $\omega = \text{sign}(\omega) \cdot |\omega|$, der Induktivität L_q in Richtung der Querachse und dem Raumzeiger des Magnetflusses

$$\underline{\Psi}_p = \hat{\Psi}_p \cdot e^{j\gamma}$$

. Gleichzeitig werden die Impulse wieder gesperrt, damit die Motorströme i_u , i_v und i_w danach wieder zu Null werden.

[0042] Bei Regelungssystemen mit äquidistanter Abtastung der Istwerte erfolgt dies vom Ablauf her vorteilhafter Weise so, dass die Impulsfreigabe um die berechnete Einschalt-dauer Δt_1 vor Beginn einer Istwert-Abtastung erfolgt und die Impulssperre synchron mit der Stromistwerterfassung erfolgt. Die einzige Anforderung an die Hardware ist dann, dass eine Impulsfreigabe bzw. -sperre einzelner Spannungszeiger entsprechend zeitlich synchronisiert zur äquidistanten Stromabtastung möglich ist.

[0043] In einer vorteilhaften Ausführungsform erfolgt die Impulssperre um eine vorbestimmte Zeit Δt_v verzögert, die sehr klein sein kann, erst nachdem die Ströme abgetastet wurden, damit die Strommessung nicht durch Schalthandlungen im Stromrichter gestört werden.

[0044] Durch Auswertung der gemessenen Stromantwort nach Betrag

$$I_1 = |\underline{i}_1| \equiv |\omega| \cdot \frac{\hat{\Psi}_p}{L_q} \cdot \Delta t_1$$

und Winkel

$$\varepsilon_1 = \arg(\underline{i}_1) \equiv \arg(-j \cdot \text{sign}(\omega) \cdot e^{j\gamma}) = \gamma - \text{sign}(\omega) \cdot \frac{\pi}{2}$$

lässt sich die Drehzahl ω prinzipiell bis auf die Drehrichtung $\text{sign}(\omega)$ und die Rotorlage γ bis auf eine 180°-Unsicherheit bestimmen. Die ermittelte Rotorlage γ entspricht dabei der Rotorlage γ zum Zeitpunkt nach Ablauf der halben Einschalt-dauer $\Delta t_1/2$.

[0045] Die Genauigkeit der ermittelten Größen verschlechtert sich allerdings mit kleiner werdender Drehzahl ω , da der Strombetrag proportional sinkt, so dass der Einfluss von Messstörungen zunimmt.

[0046] Deshalb werden bei zu kleiner Stromantwort $I_1 < I_{\min}$ weitere Nullspannungszeiger eingeschaltet, deren Einschaltzeit ggf. iterativ bis zu einer Maximaldauer erhöht wird (**Fig. 3**). Die Einschalt-dauer $k+1$ wird dabei – basierend auf der Stromantwort I_k der letzten Messung – so im voraus berechnet, dass sich am Ende der Einschalt-dauer $\Delta t(k+1)$ möglichst ein erwünschter Strombetrag I_{Soll} einstellt. Eine entsprechende Gleichung zur Ermittlung der Einschalt-dauer $\Delta t(k+1)$ lautet wie folgt:

$$\Delta t_{k+1} = \text{Min} \left\{ \Delta t_k \cdot \frac{I_{\text{Soll}}}{\text{Max} \{ I_k, I_{\min} \}}, \Delta t_{\max} \right\} \quad \text{mit} \quad I_{\min} < I_{\text{Soll}} < I_{\max}$$

[0047] Dabei wird durch die Maximumsauswahl eine zu schnelle Vergrößerung der Einschalt-dauer Δt_{k+1} verhindert, um eventuellen Messstörungen Rechnung zu tragen und durch die Minimumsauswahl die Einschalt-dauer Δt_{k+1} auf einen Maximalwert Δt_{\max} begrenzt.

[0048] Falls die Stromantwort nach einer Einschaltzeit Δt_k ausreichend groß ist (zum Zeitpunkt t_3 in **Fig. 3**), wird nach einer kurzen stromlosen Pause nochmals ein zweiter Nullzeiger V7 bzw. V8 mit gleicher Einschalt-dauer Δt_k eingeschaltet. Dies ist erforderlich, um die Drehrichtung zu bestimmen, dient aber auch zur Verbesserung der Drehzahlschätzung durch Mittelung der beiden Messungen.

[0049] Wenn die zweite Messung (Index "k2") zum Zeitpunkt t_{k2} mit gleicher Einschalt-dauer Δt_k aber um $t_{k2} - t_{k1}$ später als die Messung 1 (Index "k1") zum Zeitpunkt t_{k1} erfolgt, gilt für die Stromantworten folgende Gleichungen:

$$\underline{i}_{k1} = -j\omega \cdot \frac{\Psi_p(t_{k1})}{L_q} \cdot \Delta t_k = -j \cdot \text{sign}(\omega) \cdot e^{j\gamma(t_{k1})} \cdot \frac{|\omega| \cdot \hat{\Psi}_p \cdot \Delta t_k}{L_q} = I_{k1} \cdot e^{j\epsilon_{k1}}$$

$$\underline{i}_{k2} = -j\omega \cdot \frac{\Psi_p(t_{k2})}{L_q} \cdot \Delta t_k = -j \cdot \text{sign}(\omega) \cdot e^{j\gamma(t_{k2})} \cdot \frac{|\omega| \cdot \hat{\Psi}_p \cdot \Delta t_k}{L_q} = I_{k2} \cdot e^{j\epsilon_{k2}}$$

$$I_{k1} = \frac{|\omega| \cdot \hat{\Psi}_p \cdot \Delta t_k}{L_q}$$

$$I_{k2} = \frac{|\omega| \cdot \hat{\Psi}_p \cdot \Delta t_k}{L_q}$$

$$\epsilon_{k1} = \arg(\underline{i}_{k1}) = \gamma(t_{k1}) - \text{sign}(\omega) \cdot \frac{\pi}{2}$$

$$\epsilon_{k2} = \arg(\underline{i}_{k2}) = \gamma(t_{k2}) - \text{sign}(\omega) \cdot \frac{\pi}{2}$$

[0050] Damit lässt sich die Drehrichtung aus den Winkelargumenten bestimmen

$$\epsilon_{k2} - \epsilon_{k1} = \gamma(t_{k2}) - \gamma(t_{k1}) = \text{sign}(\omega) \cdot |\omega| \cdot (t_{k2} - t_{k1}) \Rightarrow \text{sign}(\omega) = \text{sign}(\epsilon_{k2} - \epsilon_{k1})$$

[0051] Der Betrag $|\omega|$ der Drehzahl ω ergibt sich durch Mittelung der Strombeträge beider Messungen zu

$$|\omega| = \frac{L_q}{\hat{\Psi}_p \cdot \Delta t_k} \cdot \frac{I_{k1} + I_{k2}}{2}$$

[0052] Damit ist die Drehzahl $\omega = \text{sign}(\omega) \cdot |\omega|$ bestimmt.

[0053] Der Lagewinkel γ am Ende der zweiten Messung ergibt sich ebenfalls durch Mittelung und Korrektur um die halbe Einschaltdauer Δt_k

$$\gamma(t_{k2}) = \frac{\gamma(t_{k2}) + \gamma(t_{k1}) + \text{sign}(\omega) \cdot |\omega| \cdot (t_{k2} - t_{k1})}{2} = \frac{\epsilon_{k2} + \epsilon_{k1}}{2} + \omega \cdot \frac{t_{k2} - t_{k1} + \Delta t_k}{2} + \text{sign}(\omega) \cdot \frac{\pi}{2}$$

[0054] Für einen beliebigen späteren Zeitpunkt t , z.B. bis zum anschließenden Zuschalten der eigentlichen sensorlosen Regelung im Normalbetrieb wird der Lagewinkel γ mit der nunmehr bekannten Drehzahl ω weiter extrapoliert:

$$\gamma(t) = \gamma(t_{k2}) + \omega \cdot (t - t_{k2})$$

[0055] Mit diesem Verfahren lässt sich die Drehzahl ω einschliesslich Drehrichtung $\text{sign}(\omega)$ und die Rotorlage γ bei ausreichend schnell drehender Maschine 2 sehr genau bestimmen, ohne unzulässig hohe Ströme oder Drehmomente zu produzieren.

[0056] Bei zu kleinen Drehzahlen ω ergibt sich selbst bei der Maximaldauer Δt_{\max} des Nullzeigers V7 bzw. V8 keine ausreichende Stromantwort mehr. Während sich der Betrag $|\omega|$ der Drehzahl ω noch relativ genau bestimmen lässt, lässt sich die Drehrichtmittelte Rotorlage einen Fehler von 180° aufweisen kann. Zudem müsste die stromlose Pause zwischen den beiden Nullzeigern V7 bzw. V8 gleicher Dauer sehr lang gemacht werden, wodurch sich die Dauer des Verfahrens in unerwünschter Weise verlängert.

[0057] Daher wird, falls die Stromantwort selbst bei der maximalen Einschaltdauer Δt_{\max} mit $I_k < I_{\min}$ zu klein bleibt, aus dem Strombetrag einer Messung bei maximaler Einschaltdauer Δt_{\max} vorerst nur der Betrag $|\omega|$ der Drehzahl ω gemäß folgender Gleichung:

$$|\omega| = \frac{L_q}{\hat{\Psi}_p \cdot \Delta t_{\max}} \cdot \left| \underline{i}_{k1}(\Delta t_{\max}) \right|$$

berechnet, der zweite Nullzeiger V7 bzw. V8 ausgelassen und direkt zum Teilverfahren gemäß Anspruch 2 übergegangen.

[0058] Die Detektion der Rotorlage γ bei langsam drehender Maschine 2 oder bei Stillstand erfolgt, indem ge-

mäß dem Diagramm nach **Fig. 4** mehrere kurze, genau definierte aktive Spannungszeiger V1, ..., V6 unterschiedlicher räumlicher Wirkrichtung an die Maschine 2 angelegt und die resultierenden Stromantworten ausgewertet werden.

[0059] Nach dem Anlegen eines aktiven Spannungszeigers V1 bzw. V2 bzw. V3 bzw. V4 bzw. V5 bzw. V6 – z.B. V1 in Richtung der α -Achse des Ständers (**Fig. 6**) – steigen die Phasenströme i_u , i_v und i_w schnell an (**Fig. 7**). Synchron zur Impulssperre werden die Stromspitzen abgetastet, bevor sich die Ströme mit vergleichbarer Steilheit wieder abbauen.

[0060] Die Größe der in Richtung der α - und β -Achse gemessenen Stromspitzen i_α bzw. i_β ergibt sich aus den jeweils wirksamen absoluten Induktivitäten. Aufgrund einer eventuellen Schenklichkeit der Maschine und der Vorsättigung des Ständereisens in Richtung der Rotor-d-Achse hängen, diese von der jeweiligen Rotorlage ab, wie die Messung in **Fig. 5** beispielhaft für den Zeiger V1 zeigt. Die zeitliche Dauer der aktiven Spannungszeiger V1, ..., V6 wird dabei so groß gewählt, dass die resultierenden Ströme die Vorsättigung des Ständereisens durch die Permanentmagnete messbar verstärken oder abschwächen.

[0061] Zur eindeutigen Lagedetektion sind mehrere räumlich versetzte aktive Spannungszeiger V1, ..., V6 erforderlich. Außerdem soll das erzeugte Drehmoment im Mittel Null sein, um keine unerwünschte Rotordrehung hervorzurufen. Daher werden die um 120° versetzten Raumzeiger in Richtung der Wicklungsachsen u-v-w und jeder Raumzeiger jeweils mit seinem entgegengesetztem Raumzeiger zu einer Testpulsfolge kombiniert. Für das Verfahren ist es unerheblich, welche der verschiedenen möglichen Kombinationen als Testpulsfolge verwendet wird.

[0062] Eine solche Testpulsfolge aus sechs aktiven Spannungszeigern V1, ..., V6 ist beispielhaft in **Fig. 6** und die dabei gemessene Ströme sind in der **Fig. 7** in einem Diagramm über der Zeit t dargestellt. Da nur die sechs möglichen aktiven Spannungszeiger V1, ..., V6 eines Stromrichters 4, insbesondere eines Pulsstromrichters, verwendet und diese jeweils nach Impulssperre eingeschaltet werden, sind die Fehler der jeweils erzeugten Spannungszeitflächen im wesentlichen nur durch das Einschaltverhalten bedingt und daher gering und für alle Phasen annähernd gleich. Zur Bestimmung der Rotorlage wird aus den sechs komplexen Stromantworten

$$\underline{i}_m = i_{\alpha m} + j \cdot i_{\beta m}$$

ein Summenstromzeiger

$$\underline{\Delta i} = \Delta i_\alpha + j \cdot \Delta i_\beta = \sum_{m=1}^6 \underline{i}_m$$

gebildet.

[0063] Da die α - und β -Komponente annähernd cosinus- bzw. sinusförmig von der elektrischen Rotorlage γ abhängt (**Fig. 8**), lässt sich der Lagewinkel γ einfach durch eine arctan-Funktion

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\Delta i_\beta}{\Delta i_\alpha}\right)$$

bestimmen, wobei die Winkel-Quadranten-Auswahl entsprechend den Vorzeichen der α - und β -Komponente zu erfolgen hat. Die Abweichung zwischen dem so geschätzten Winkel und dem wirklichen, z.B. mit einem Encoder gemessenen, Winkel liegt bei Stillstand typischerweise unterhalb 5° elektrisch.

[0064] Wird das bisher beschriebene Verfahren mit einer Testpulsfolge aus sechs aktiven Spannungszeigern V1, ..., V6 nicht nur im Stillstand, sondern auch bei drehender Maschine 2 angewendet, beeinflusst die EMK die Stromantworten und verfälscht so mit zunehmender Drehzahl ω immer mehr die detektierte Rotorlage γ .

[0065] Die Stromantworten ergeben sich in erster Näherung durch Überlagerung der Wirkung der angelegten Ständerspannung und der EMK. Daher lassen sich die EMK-bedingten Fehler kompensieren, indem zusätzliche Nullspannungszeiger V7 bzw. V8, vorteilhafter Weise zeitlich symmetrisch, in die Testpulsfolge eingefügt und diese geeignet ausgewertet werden. Für das Verfahren ist es unerheblich, ob dabei jeweils der Nullspannungszeiger V7 oder V8 verwendet wird. Beispielhaft ist in **Fig. 4** eine solche Testpulsfolge aus sechs aktiven Spannungszeigern V1, ..., V6 und vier Nullspannungszeigern V7 bzw. V8 mit den bei langsam drehender Maschine 2 gemessenen Ströme i_u und i_v dargestellt.

[0066] Zur Bestimmung der Rotorlage γ wird wie oben beschrieben ein Summenstromzeiger

$$\underline{\Delta i}_{AZ}$$

der aktiven Spannungszeiger V1, ..., V6 gemäß folgender Gleichung:

$$\underline{\Delta i_{AZ}} = \Delta i_{\alpha AZ} + j \cdot \Delta i_{\beta AZ} = \sum_{m_{AZ}=1}^{N_{AZ}=6} \underline{i_{m_{AZ}}}$$

und zusätzlich ein Summenstromzeiger

$$\underline{\Delta i_{NZ}}$$

der Nullspannungszeiger V7, V8 gemäß folgender Gleichung:

$$\underline{\Delta i_{NZ}} = \Delta i_{\alpha NZ} + j \cdot \Delta i_{\beta NZ} = \sum_{m_{NZ}=1}^{N_{NZ}=6} \underline{i_{m_{NZ}}}$$

gebildet.

[0067] Vom Summenstromzeiger

$$\underline{\Delta i_{AZ}}$$

der N_{AZ} aktiven Spannungszeiger V1, ..., V6 wird der mit einem Faktor C_{NZ} gewichtete Summenstromzeiger

$$\underline{\Delta i_{NZ}}$$

der N_{NZ} Nullzeiger V7, V8 abgezogen:

$$\underline{\Delta i} = \Delta i_{\alpha} + j \cdot \Delta i_{\beta} = \underline{\Delta i_{AZ}} - C_{NZ} \cdot \underline{\Delta i_{NZ}}$$

[0068] Der Wichtungsfaktor C_{NZ} ergibt sich entsprechend dem Verhältnis der Gesamteinschaltdauer von aktiven Spannungszeigern V1, ..., V6 zu Nullspannungszeigern V7, V8. Falls die einzelnen Einschalt Dauern von aktiven Spannungszeigern V1, ..., V6 und Nullspannungszeigern V7, V8 jeweils gleich gewählt werden, ergibt sich hier einfach das Verhältnis der Anzahl N_{AZ} der aktiven Spannungszeigern V1, ..., V6 zur Anzahl N_{NZ} der Nullspannungszeiger V7, V8 ($C_{NZ} = N_{AZ}/N_{NZ}$ z.B. 6/4 für Fig. 4). Aus diesem korrigierten Summenstromzeiger

$$\underline{\Delta i}$$

wird dann der Lagewinkel γ wie oben beschrieben durch eine arctan-Funktion berechnet.

[0069] Damit lassen sich auf einfache Weise die EMK-bedingten Fehler kompensieren, so dass die ermittelte Rotorlage γ auch dann noch ausreichend genau ist, wenn sich die Maschine 2 dreht.

[0070] Indem der jetzt bekannte Rotorlagewinkel γ mit dem Winkel ε_{k1} der vorher im ersten Verfahrensabschnitt für drehende Maschine 2 gemessenen Stromantwort

$$\underline{i_{k1}}$$

verglichen wird, lässt sich jetzt auch die mit dem ersten Verfahrensabschnitt nicht zuverlässig bestimmbare Drehrichtung gemäß folgender Gleichung:

$$\text{sign}(\omega) = \text{sign}\left(\frac{2}{\Pi} \cdot (\gamma - \varepsilon_{k1})\right)$$

feststellen. Somit ist dann auch die Drehzahl ω bzgl. Betrag $|\omega|$ und Vorzeichen $\text{sign}(\omega)$ bekannt.

[0071] Der ermittelte Lagewinkel γ entspricht einem Zeitpunkt t_M nach der halben Dauer der Testpulsfolge. Bei nunmehr bekannter Drehzahl ω lässt sich diese Rotorlage $\gamma(t_M)$ problemlos auf den Zeitpunkt t_E am Ende Testpulsfolge gemäß folgender Gleichung:

$$\gamma(t_E) = \gamma(t_M) + \omega \cdot (t_E - t_M)$$

[0072] Weiterrechnen der Lagewinkel γ für einen beliebigen späteren Zeitpunkt t , z.B. bis zum anschließenden Zuschalten der eigentlichen sensorlosen Regelung im Normalbetrieb, weiter extrapolieren, wobei folgende Gleichung

$$\gamma(t) = \gamma(t_E) + \omega \cdot (t - t_E)$$

verwendet werden kann. Dadurch lassen sich auch die durch die Änderung der Rotorlage γ während der Mes-

sung verursachten Fehler größtenteils kompensieren.

[0073] Die erfindungsgemäße Testpulsfolge mit zusätzlichen Nullspannungszeigern V7, V8 gestattet somit nicht nur bei Stillstand, sondern auch bei langsam drehender Maschine 2 eine genaue Detektion der Rotorlage γ und Drehzahl ω .

[0074] Das erfindungsgemäße Verfahren lässt sich bevorzugt anwenden zum Start von stillstehenden oder drehenden Antrieben mit am Wechselrichter 4 betriebenen permanenterregten Synchronmaschinen 2, bei denen aus Aufwands-, Zuverlässigkeits-, Platz-, Genauigkeits- oder anderen Gründen auf Lage- und Drehzahlgeber verzichtet werden muss, z.B. bei hochpoligen Direktantrieben. Möglich ist auch die Anwendung bei Antrieben mit am Wechselrichter 4 betriebener permanenterregter Synchronmaschine 2, bei denen nur ein Drehzahlgeber, z.B. mit geringer Auflösung, aber kein Absolutlagegeber vorhanden ist. Insbesondere in der Traktion, wo eine Maschine nach einer Impulssperre bei jeder Drehzahl ω gefangen, d.h. möglichst schnell und ohne unerwünschte Begleiterscheinungen wie Überstrom oder unzulässige Drehmomentstöße wieder zugeschaltet werden kann, ist das erfindungsgemäße Verfahren besonders vorteilhaft einsetzbar.

[0075] Bei Antrieben, bei denen aus technischen Gründen nur eine Drehrichtung möglich und diese bekannt ist, lässt sich das Verfahren in vereinfachter Form anwenden, da die zur Bestimmung der Drehrichtung notwendigen Schritte ausgelassen werden können.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung einer Startrotorlage (γ) und Drehzahl (ω) bei Impulsfreigabe einer stromrichtergespeisten, permanenterregten Synchronmaschine (2) ohne Lage- und Drehzahlgeber, wobei für eine vorbestimmte Einschaltdauer (Δt) ein Nullspannungszeiger (V7, V8) an die Synchronmaschine (2) geschaltet wird, wobei mit Ablauf dieser Einschaltdauer (Δt) eine Stromantwort (i_u, i_v) gemessen und eine Impulssperre geschaltet werden, wobei aus der Stromantwort (i_u, i_v) ein Strombetrag (I_1) und ein Stromwinkel (ϵ_1) eines zugehörigen Stromraumzeigers berechnet werden, wobei diese Verfahrensschritte nach einer vorbestimmten Zeitspanne wiederholt werden, und wobei aus den berechneten Strombeträgen (I_{k1}, I_{k2}) und Stromwinkeln ($\epsilon_{k1}, \epsilon_{k2}$) eine Startrotorlage (γ) und eine Drehzahl (ω) bestimmt werden, dadurch gekennzeichnet, dass für die Einschaltdauer (Δt) des ersten Nullspannungszeigers (V7, V8) ein Minimalwert (Δt_1) berechnet wird, der in Abhängigkeit einer Stromantwort (i_u, i_v) derart verlängert wird, dass nach Anschaltung eines oder mehrerer weiterer Nullspannungszeiger (V7, V8) eine Stromantwort (i_u, i_v) mit vorbestimmten Strombetrag (I_{sol}) sich einstellt, und dass der zweite Nullspannungszeiger (V7, V8) für diese verlängerte Einschaltdauer (Δt_k) an die Synchronmaschine (2) angeschaltet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass wenn bei maximaler Einschaltdauer (Δt_{max}) eines Nullspannungszeigers (V7, V8) der Strombetrag ($2k$) einer Stromantwort (i_R, i_S) kleiner eines minimalen Strombetrages (I_{min}) bleibt, aus diesem Strombetrag (I_k) der Betrag ($|\omega|$) der Drehzahl (ω) berechnet wird, und dass daran anschließend nacheinander jeweils für eine vorbestimmte Zeitspanne an die Synchronmaschine (2) einer der aktiven Spannungszeiger (V1, ..., V6) geschaltet wird, dass mit Ablauf einer jeden Zeitspanne eine Stromantwort

($\underline{i_m}$)

gemessen und eine Impulssperre geschaltet wird, dass aus den gemessenen Stromantworten

($\underline{i_m}$)

ein Summenstromzeiger

($\underline{\Delta i}$)

gebildet wird, aus dessen orthogonalen Komponenten ($\Delta i_\alpha, \Delta i_\beta$) mittels einer Winkelfunktion eine Startrotorlage (γ) berechnet wird, und dass in Abhängigkeit des Stromwinkels (ϵ_{k1}) und dieser Startrotorlage (γ) eine Drehrichtung ($\text{sign}(\omega)$) ermittelt und damit die Drehzahl (ω) berechnet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der berechnete Lagewinkel ($\gamma(t)$) in Abhängigkeit der ermittelten Drehzahl (ω) auf einen Zeitpunkt (t_E) am Ende der Folge geschalteter aktiver Spannungszeiger (V1, ..., V6) oder einen späteren Zeitpunkt weitergerechnet wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzliche Nullspannungszeiger (V7, V8) zu den aktiven Spannungszeigern (V1, ..., V6) geschaltet und zugehörige Stromantworten (i_{Nz}) gemessen werden, dass aus diesen zugehörigen Stromantworten (i_{Nz}) ein Summenstromzeiger

(Δi_{NZ})

gebildet und gewichtet wird, und dass der Summenstromzeiger

(Δi)

aus der Differenz eines Summenstromzeigers

(Δi_{AZ})

der Stromantworten (i_{AZ}) der aktiven Spannungszeiger ($V1, \dots, V6$) und des gewichteten Summenstromzeigers

($C_{NZ} \cdot \Delta i_{NZ}$)

gebildet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die zusätzlichen Nullspannungszeiger ($V7, V8$) symmetrisch in die Folge der aktiven Spannungszeiger ($V1, \dots, V6$) geschaltet werden.

6. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die aktiven Spannungszeiger ($V1, \dots, V6$) derart zeitlich aneinander gereiht sind, dass ein erzeugtes Drehmoment im Mittel Null ist.

7. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die vorbestimmte Zeitspanne eines jeden aktiven Spannungszeigers ($V1, \dots, V6$) derart lang gewählt ist, dass jeder resultierende Strom die Vorsättigung des Ständereisens durch die Permanentmagnete der Synchronmaschine (2) messbar verstärken oder abschwächen.

8. Verfahren nach Anspruch 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Gewichtungsfaktor (C_{NZ}) gleich dem Verhältnis der Anzahl von aktiven Spannungszeigern ($V1, \dots, V6$) zur Anzahl der zusätzlichen Nullspannungszeiger ($V7, V8$) ist.

9. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Impulssperre um eine Zeit verzögert erst nach der Stromistwerterfassung erfolgt.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

FIG 1

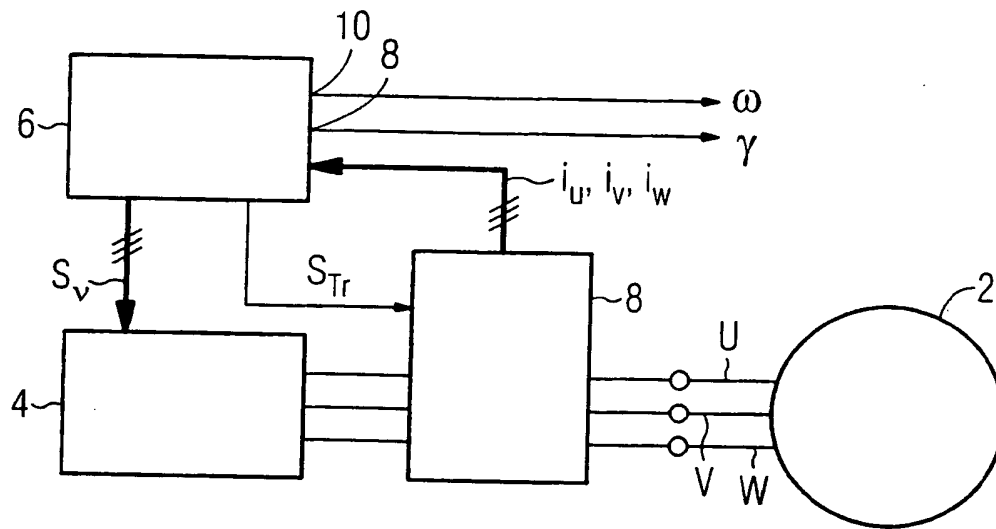


FIG 2

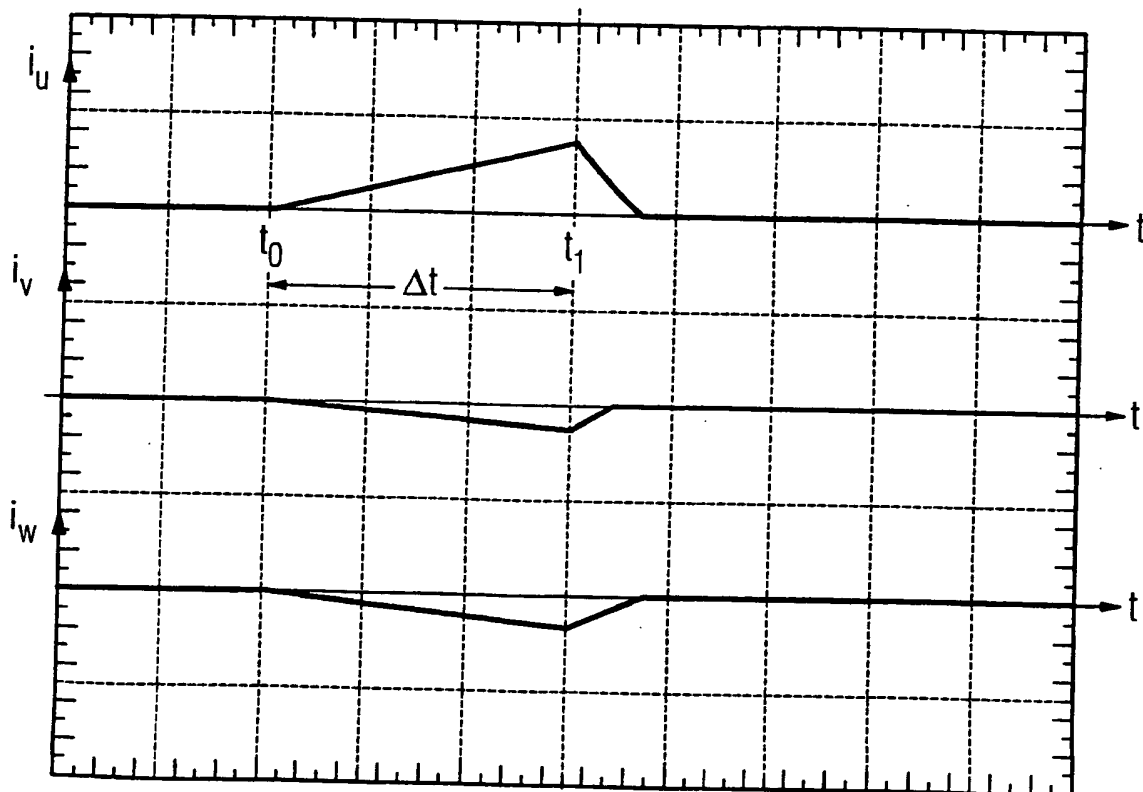


FIG 3

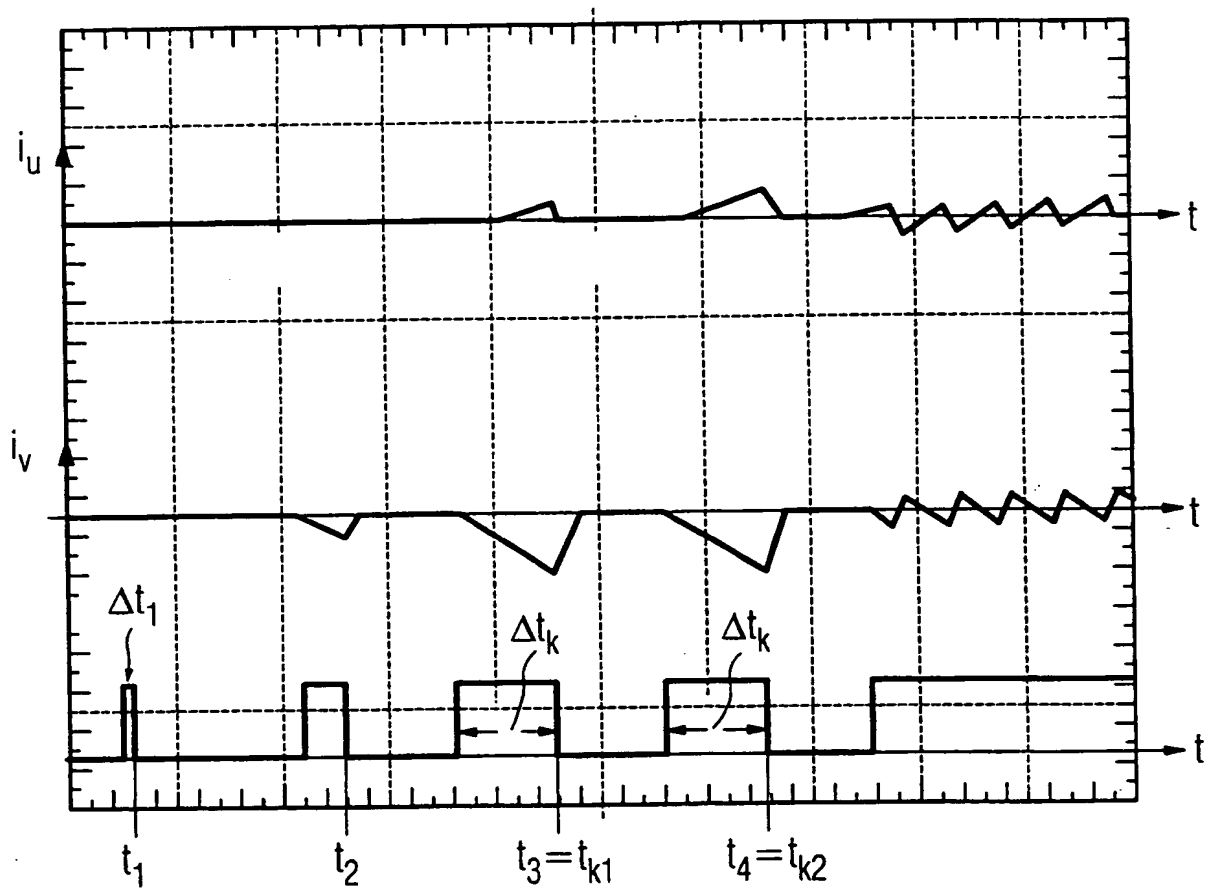


FIG 4

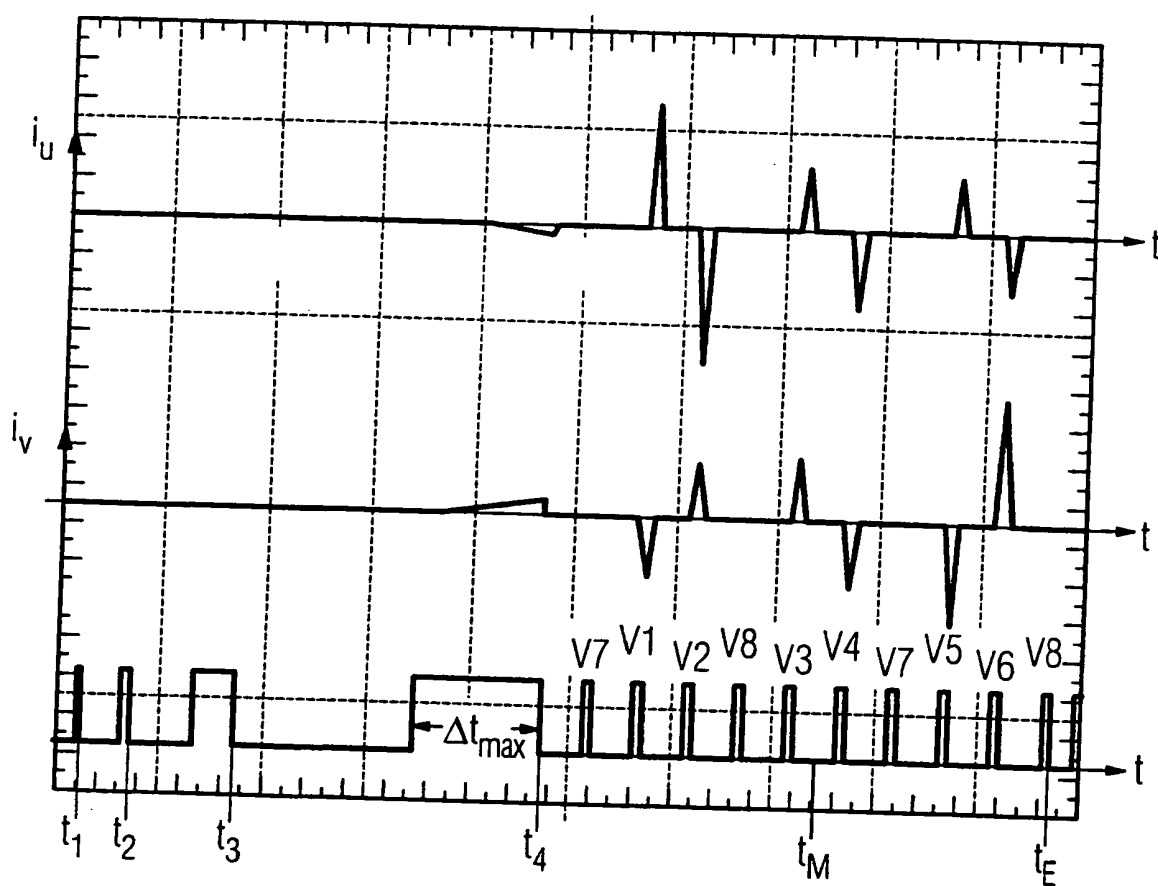


FIG 5

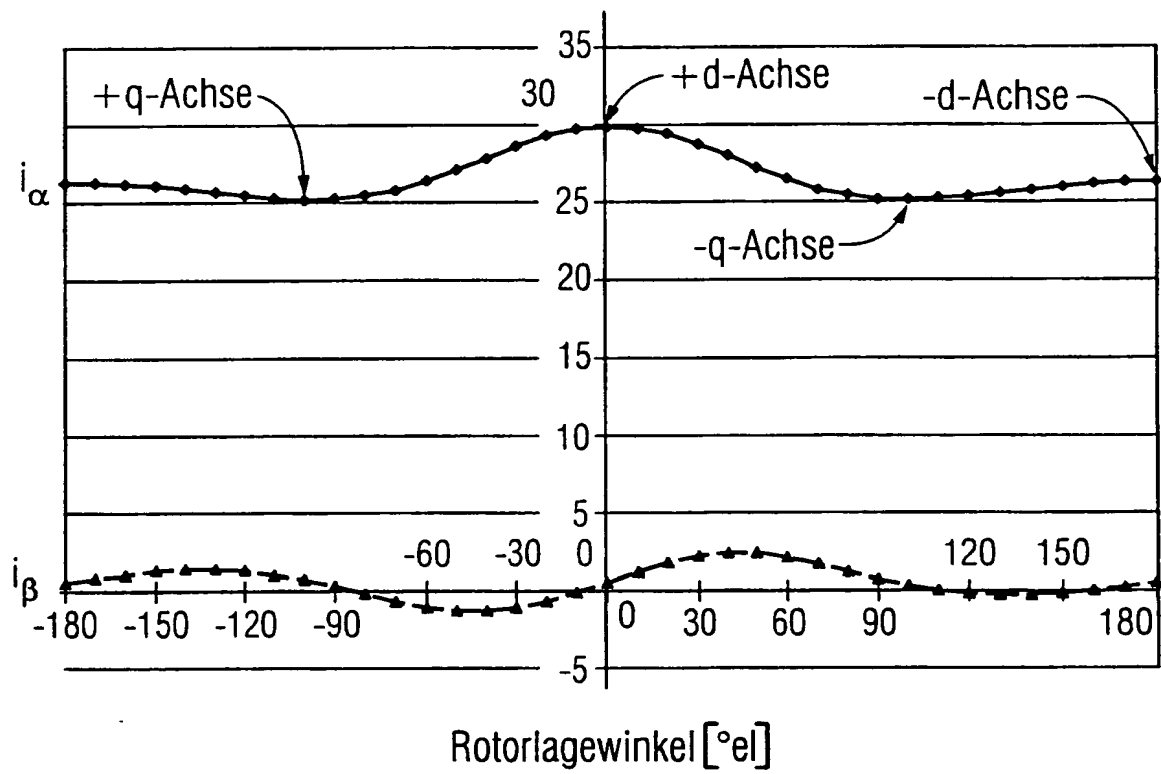


FIG 6

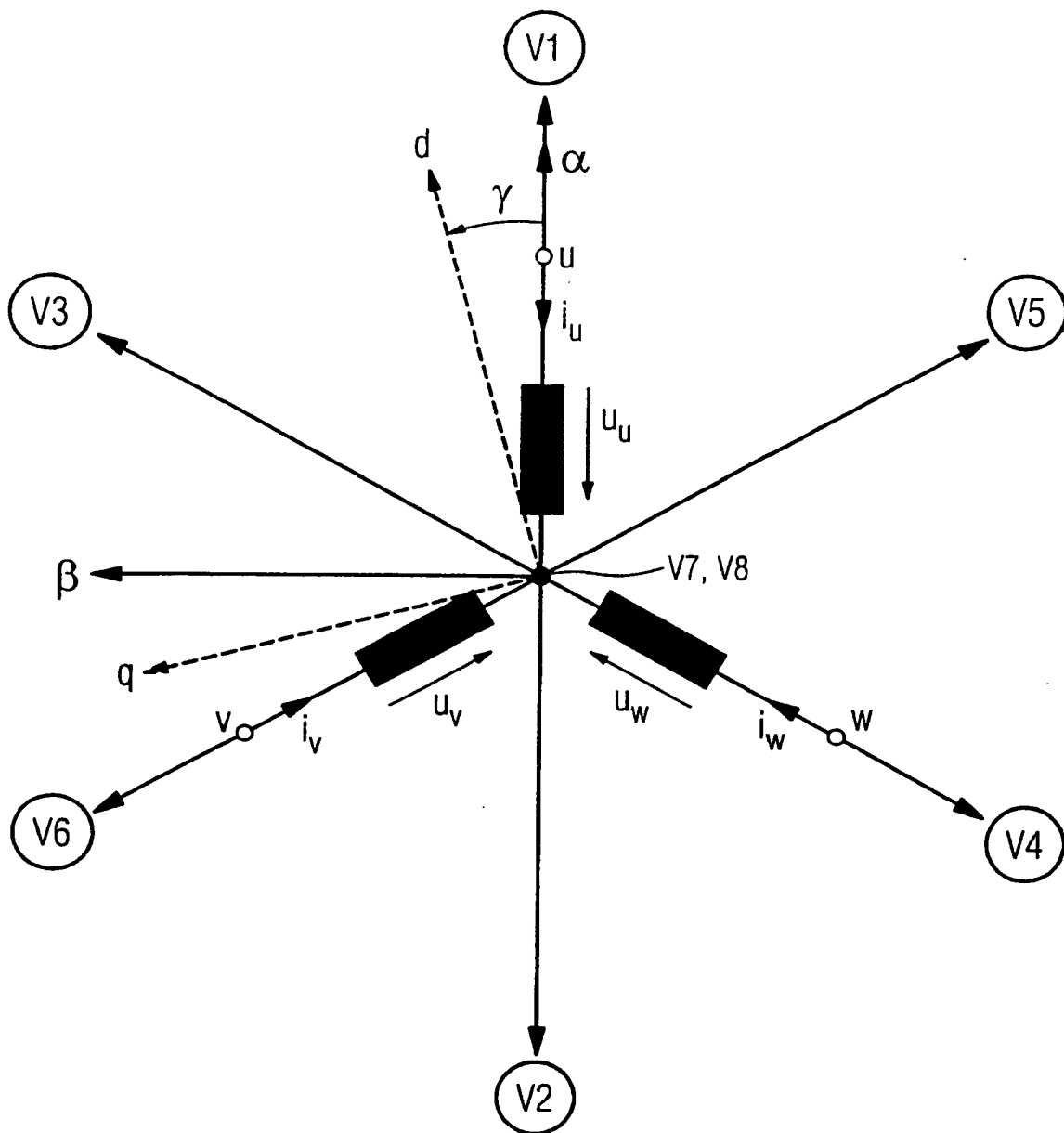


FIG 7

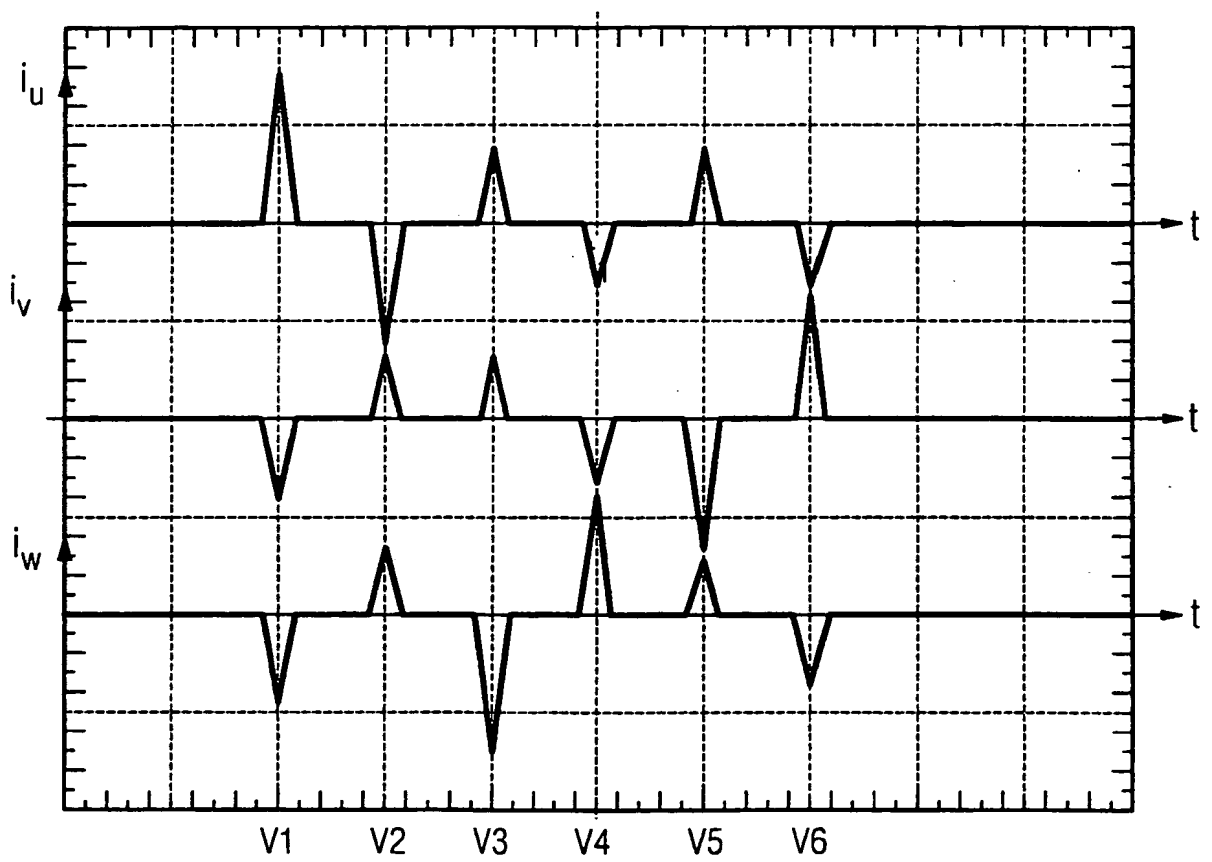


FIG 8

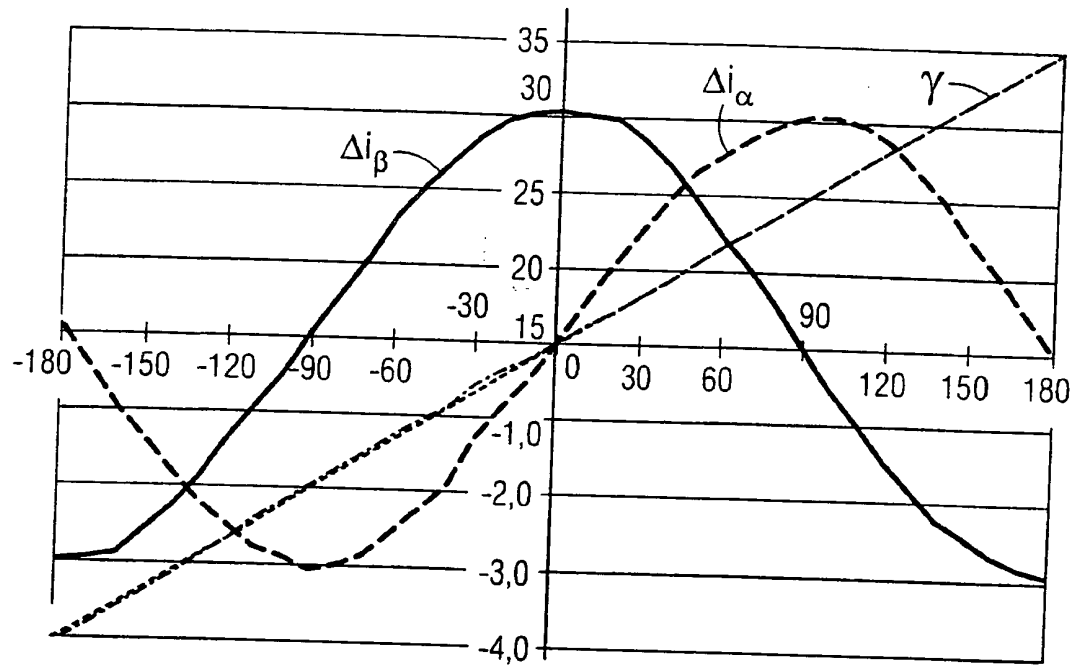
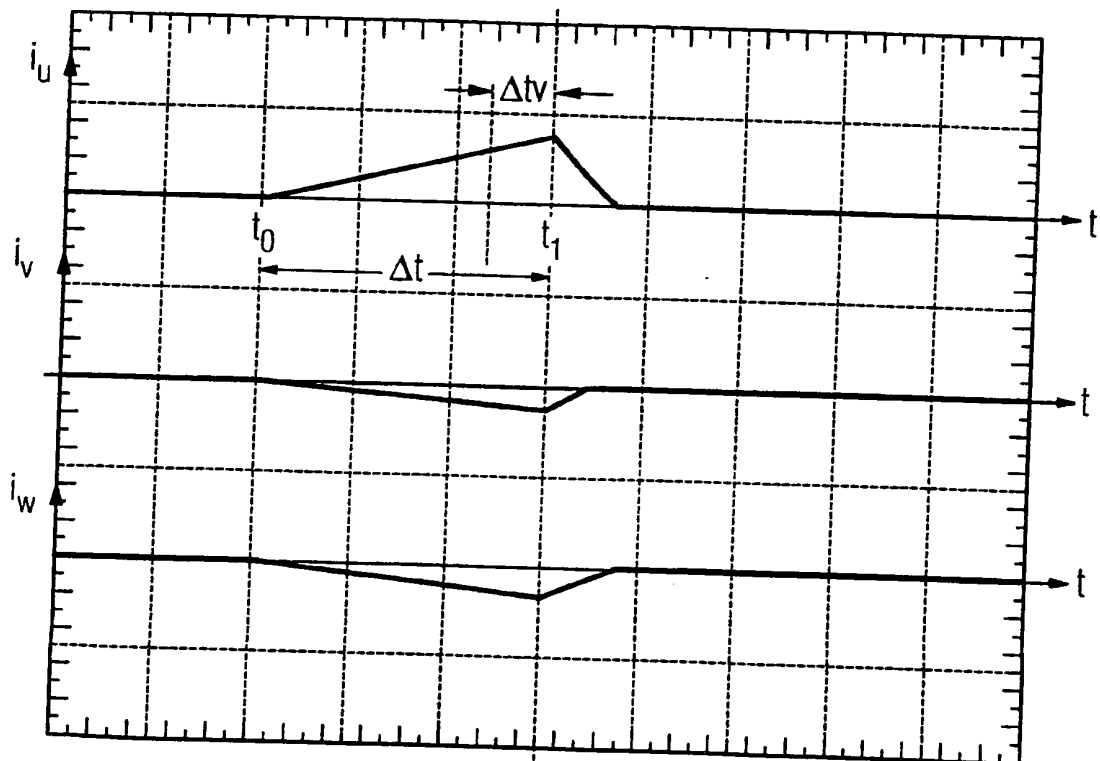


FIG 9



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.

This Page Blank (uspto)